

Metrología

Medir es Comparar

- La comparación exige que haya dos objetos, reales o virtuales: el dispositivo o sistema bajo prueba, (lo que es medido) y aquello contra lo que se compara: **PATRÓN**.
- La comparación se realiza sobre una sola de las cualidades del patrón y del dispositivo bajo prueba. Al **valor numérico resultante de la comparación de esa cualidad, lo llamamos magnitud o medida** y le asociamos una palabra para diferenciarlo de otras cualidades: **UNIDAD**.
- La comparación se hará siguiendo una serie de pasos indicados por nuestro conocimiento sobre el tema. En muchos casos se acuerda un procedimiento común para uniformizarlo entre distintos operadores. Esos acuerdos escritos se denominan **NORMAS** (de medición).
- Independientemente del procedimiento es imposible hacer una comparación "perfecta". Se puede **evaluar** "cuan lejos" como máximo puede estar la magnitud obtenida del valor real de la magnitud: es lo que llamamos **incertidumbre**.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Sistema internacional de unidades

El Sistema Internacional define un conjunto de siete unidades básicas a partir de las que se definen las demás. Se han elegido magnitudes que no están relacionadas entre sí por ninguna ley física:

Magnitud	Unidad	Símbolo
Tiempo	Segundo	s
Longitud	Metro	m
Masa	Kilogramo	Kg
Cantidad de materia	Mol	Mol
Temperatura termodinámica	Kelvin	K
Corriente eléctrica	Amperio	A
Intensidad luminosa	Candela	Cd

Sistema internacional de unidades

Definición de las unidades

- Tiempo:** La unidad de tiempo del SI, el segundo, se define como la duración de 9 192 631 770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado base del ^{133}Cs .
- Longitud:** La unidad de longitud del SI, el metro, se define como la distancia recorrida en el vacío por la luz durante un intervalo de tiempo de $1/299\,792\,458$ de segundo.
- Masa:** La unidad de masa del SI, el kilogramo, $\text{kg} = \frac{h}{c^2 \lambda}$, donde $h = 6.62607015 \times 10^{-34}$ es la constante de Planck y $c = 2.99792458 \times 10^8$ m/s la velocidad de la luz en el vacío y λ el segundo antes definido. Hasta 20/5/2019 fue igual a la masa del prototipo internacional depositado en el BIPM (hasta 1875 era el peso de un dm^3 de agua).
- Corriente eléctrica:** A partir del 20/5/2019 la unidad de corriente eléctrica del SI, el amperio, se define al decir que la carga del electrón es $1.602176634 \times 10^{-19}$ As (Ampere, segundo=Coulomb). Desde 1948 era la corriente continua que, mantenida en dos conductores rectos paralelos de longitud infinita, de sección circular despreciable, ubicados a una distancia de un metro en vacío, produce una fuerza entre ambos de 2×10^{-7} newton por cada metro de longitud.

Sistema internacional de unidades

Definición de las unidades

- Temperatura:** La unidad es el kelvin es igual a la variación de temperatura termodinámica que da lugar a una variación de energía térmica kT de $1.380\,649 \times 10^{-23}$ J. Hasta el 20/5/19 era la fracción $(1/273.16)$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua.
- Intensidad luminosa:** La unidad de intensidad luminosa del SI, la candela, es la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite radiación monocromática de frecuencia 5.40×10^{14} Hz y tiene una intensidad radiante en esa dirección de $1/683$ watt/sr.
- Cantidad de materia:** La unidad de cantidad de materia del SI, el mol, contiene exactamente $6.02214076 \times 10^{23}$ entidades elementales.

Sistema internacional de unidades

Unidades derivadas

Las demás unidades son derivadas de las siete anteriores:

Ej.: El **potencial eléctrico** tiene como unidad al **Voltio**, símbolo V, que es la diferencia de potencial que existe entre dos puntos de un conductor por el que circula una corriente eléctrica constante de 1A cuando la potencia disipada entre esos dos puntos es igual a 1W:

$$V = \frac{W}{A} = \left(\frac{N \cdot m}{s} \right) / (A) = \frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s^3}$$

Por las relaciones físicas entre las magnitudes es posible vincular las unidades derivadas a las básicas:

kg, m, A y s

Sistema internacional de unidades

Múltiplos y submúltiplos

Factor	nombre	símbolo	Factor	nombre	símbolo
10^{24}	yotta	Y	10^{-1}	deci	d
10^{21}	zetta	Z	10^{-2}	centi	c
10^{18}	exa	E	10^{-3}	milli	m
10^{15}	peta	P	10^{-6}	micro	μ
10^{12}	tera	T	10^{-9}	nano	n
10^9	giga	G	10^{-12}	pico	p
10^6	mega	M	10^{-15}	femto	f
10^3	kilo	k	10^{-18}	atto	a
10^2	hecto	h	10^{-21}	zepto	z
10^1	deca	da	10^{-24}	yocto	y

SIMELA

Sistema métrico legal argentino

► Se estableció por ley 19511 de 1972 modificada por la 27444/2018 reglamentado por el decreto 788/2003 y 960/2017

Art. 1.- El Sistema Métrico Legal Argentino (SIMELA) estará constituido por las unidades, múltiplos y submúltiplos de las unidades del Sistema Internacional de Unidades de Medidas (SI) acordados en la Convención del Metro del 20 de mayo de 1901 y por los submúltiplos, múltiplos, submúltiplos y símbolos ajenos al Sistema Internacional de Unidades de Medidas, conforme se describe en el Anexo incorporado a este texto.

Art. 3.- El Poder Ejecutivo Nacional tiene un patrón nacional para cada unidad que lo admita, el cual tendrá carácter de excluyente y será custodiado y mantenido, así como sus testigos, en la forma que establezca la reglamentación.

Art. 15.- Queda prohibida la fabricación, importación, venta, oferta, propaganda, anuncio o exhibición de instrumentos de medición graduados en unidades ajenas al SIMELA, aún cuando se consignen paralelamente las correspondientes unidades legales. Podrán admitirse excepciones cuando se trate de instrumentos de medición destinados a la exportación, al control de operaciones relacionadas con el comercio exterior o al desarrollo de actividades culturales, científicas o técnicas.

SIMELA

Sistema métrico legal argentino

Art. 21.- Todos los tenedores y usuarios de instrumentos de medición sujetos a fiscalización periódica y vigilancia de uso deberán registrarse en las oficinas de contraste periódico de su jurisdicción, en la forma y tiempo que se reglamente.

Art. 28.- EL servicio nacional de aplicación se integrará con los organismos que establezca el Poder Ejecutivo Nacional, el que delimitará sus competencias sobre las siguientes funciones:..... y mantener relación con la Oficina Internacional de Pesos y Medidas con la Organización Internacional de Metrología Legal, con el Comité de Metrología y de Enseñanza y con el Comité de Metrología y de Enseñanza del país y del extranjero, pudiendo organizar, participar en, o auspiciar la realización de congresos o conferencias nacionales o internacionales y proponer la designación de delegados;

DECRETO 788 Artículo 1°:

— El servicio nacional de aplicación, previsto en la Ley N° 19.511, se integrará con la SECRETARÍA DE COORDINACIÓN TÉCNICA y el INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL, organismo autárquico dependiente de la SECRETARÍA DE INDUSTRIA, COMERCIO Y DE LA PEQUEÑA Y MEDIANA EMPRESA, ambos dependientes del MINISTERIO DE ECONOMÍA Y PRODUCCIÓN.

Patrones

Los patrones sirven para definir o reproducir uno o más valores de una magnitud y trasladar a otros instrumentos de medición su condición de patrones mediante mediciones comparativas.

Idealmente deberían ser muy estables y fácilmente reproducibles.

Los patrones no son todos iguales y no son (históricamente) siempre los mismos. Hay diferentes "categorías" metrológicas y la evolución tecnológica impacta en su construcción.

Patrones. Categorías

Patrón primario:

Es un patrón que tiene la mayor jerarquía metrológica dentro de un área específica, es decir que se obtiene como resultado de la realización de la definición de la unidad. Este concepto se aplica igualmente a unidades de base o derivadas.

Patrón nacional:

Es un patrón reconocido por una decisión nacional oficial, como la base para fijar el valor, dentro del país, de todas los otros patrones de la magnitud considerada.

Patrón de referencia:

Es el patrón de la mayor jerarquía metrológica disponible en un lugar, a partir del cual se realizan en ese lugar todas las mediciones.

Patrón de trabajo:

Es un patrón calibrado a partir del patrón de referencia, que se utiliza rutinariamente para calibrar medidas materializadas o instrumentos de medición. Los patrones han evolucionado en el tiempo y no en todas las magnitudes tienen la misma incertidumbre.

Patrones. Trazabilidad

ESQUEMA DE TRAZABILIDAD METROLÓGICA



► Trazabilidad según ISO

La propiedad del resultado de una medida o del valor de un estándar que le permite relacionarlo con referencias especificadas, usualmente estándares nacionales o internacionales, a través de una cadena continua de comparaciones todas con incertidumbres especificadas.

B NIST(USA), PTB(Alemania), NPL(Reino Unido) CEM(España), INTI(Argentina), CENAM(México), INMETRO(Brasil), NRC(Canadá), etc. tienen patrones primarios que comparan entre ellos y los patrones nacionales que sirven de referencia local.

Patrones. Incertidumbres

Los patrones han evolucionado tecnológicamente en el tiempo disminuyendo sus incertidumbre. No en todas las magnitudes tienen la misma incertidumbre.

SI Base Unit	Physical Quantity	Uncertainty
candela	luminous intensity	1×10^{-4}
mole	amount of substance	8×10^{-8}
kelvin	thermodynamic temperature	3×10^{-7}
ampere	electric current	4×10^{-9}
kilogram	mass	1×10^{-8}
meter	length	1×10^{-12}
second	time interval	1.3×10^{-16}

El patrón que tiene menos incertidumbre porcentual es el del segundo. En magnitudes eléctricas el volt y el ohm si bien son magnitudes derivadas tienen patrones con incertidumbres muy bajas por el tipo de fenómenos involucrados en su construcción.

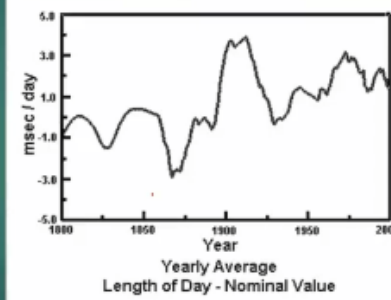
Patrones. Tiempo

Se usa un fenómeno natural que se repite en forma periódica.

Históricamente el período de rotación de la tierra fue el patrón primario de referencia y la definición de la unidad.

El segundo se definió mucho tiempo (hasta 1960) como 1/86400 del período de rotación terrestre.

Variaciones del orden de los milisegundos por día (largo plazo=10⁻²) son propios del patrón de tiempo "período de rotación de la tierra".



El período de oscilación del péndulo (Galileo 1583) es un fenómeno regular de período "más corto" que permitió crear los primeros relojes precisos y exactos.

Patrones. Tiempo

Patrones atómicos: Comenzaron a usarse a partir de 1950. Se basan en la frecuencia (f_0) de un fotón emitido por un cambio de nivel energético del átomo:

$$f_0 = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

Teóricamente perfecto hay, sin embargo, pequeñas variaciones por efecto Doppler debido a la agitación térmica y el efecto de campos externos de otros átomos.

Desde 1967 se usa el patrón de tiempo como **definición** de la magnitud: El segundo se define (BIPM, 1997) como el tiempo correspondiente a la duración de 9 192 631 770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles (líneas) del estado estable del átomo de Cesio 133 cuando el átomo está a temperatura de 0 K.

Patrones. Tiempo

Maser de Hidrógeno. (voluminoso y muy costoso. El más preciso en el corto plazo)

Cesio (10⁻¹², costoso, poca vida útil) (definición del segundo). El primero es de 1955

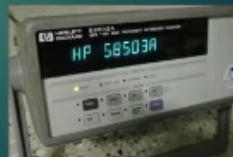
Cesio enfriado por láser (NIST F1-1999, NIST F2-2014) (10⁻¹⁵) (definición del segundo)

NIST F1
<https://www.youtube.com/watch?v=9ikbD7UGz0I>

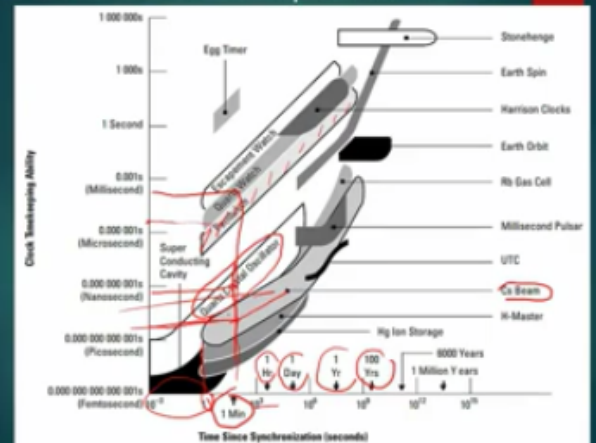


Bucle de cuarzo (larga vida útil, fácilmente portable, 10⁻¹¹)

GPSDO (10⁻⁹/10⁻¹¹)
Oscilador de Cuarzo con temperatura controlada (OCXO) (10⁻⁷/10⁻⁹)



Patrones de tiempo históricos



Patrones: Tensión. Celda Josephson

En 1962 Josephson descubrió que si entre dos superconductores finos dotados de una finísima capa aislante (de aproximadamente 10⁻⁶ mm) circula una corriente continua, aparecen tensiones alternas de alta frecuencia de algunos GHz.



Brian David Josephson
1940- Nobel 1973

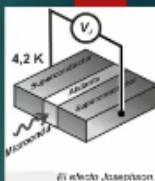
El cociente entre la frecuencia f y la tensión V_J es una constante de la naturaleza.

$$f/V_J = 680$$

donde h es la constante de Planck, e la carga del electrón y f la frecuencia de la onda electromagnética que atraviesa la unión Josephson. $K_J (=2e/h)$ es la constante de Josephson

Patrones: Tensión. Celda Josephson

En 1977 se comprobó que el efecto es reversible y se puede utilizar inversamente para la producción de tensiones extremadamente estables a partir de una frecuencia conocida.

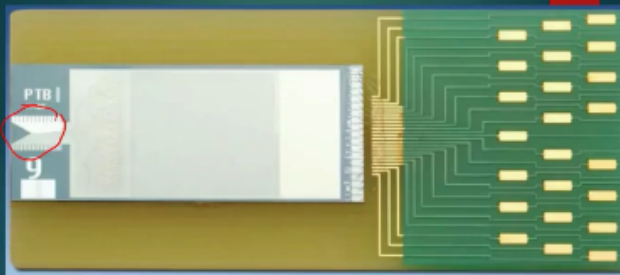


Aprovechando el efecto Josephson puede construirse un patrón de tensión a partir de uno de tiempo. Mediante un arreglo de uniones Josephson en serie se puede obtener patrones de diferentes tensiones. La tensión eléctrica total V_J de n celdas conectadas en serie resulta:

$$\frac{nf}{K_J} = V_J$$

La constante de Josephson, $K_J (=2e/h)$ fue definida por el BIPM en 1990 con un valor igual a $K_{J90} = 483597.9 \text{ GHz/V}$.

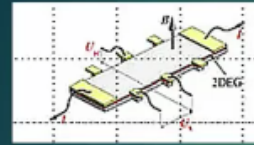
Patrones: Celda Josephson PTB



Usualmente f está en el orden de 70GHz (72-78 GHz) y n se elige para que la tensión del conjunto sea 1 V, 10V o 12V (decenas de miles de celdas para 10 V).

La temperatura para lograr la superconductividad es de 4,2K.

Patrones: Resistencia



Klaus von Klitzing
1985
Nobel física 1985



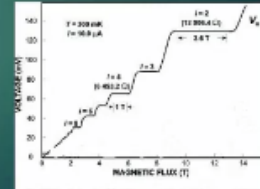
Efecto hall cuántico:

En sistemas bidimensionales sometidos a bajas temperaturas y fuertes campos magnéticos transversales, al circular una corriente aparece una tensión (de Hall) perpendicular a I y a B que toma valores cuantizados.



Tensión de Hall vs B

Celda real usada



Patrones: Resistencia

La relación de la corriente circulante con la tensión (la conductividad σ) también estará cuantizada según:

$$\sigma = n \frac{e^2}{h}$$

La cuantización de la conductancia de Hall tiene la importante propiedad de ser increíblemente exacta.

Las medidas reales de la conductancia han resultado ser enteras o múltiplos fraccionarios de e^2/h en casi una parte de 1 billón.

La resistencia de una celda de este tipo será entonces:

$$R_h = \frac{R_{k-90}}{n}$$

$R_{k-90} = h/e^2 = 25812.807 \Omega$ es la constante de von Klitzing, n es un número entero que representa el escalón donde se está midiendo la R_h .

Normas

Son:

ACUERDOS VOLUNTARIOS

Entre:

las **partes interesadas** en un tema (gobierno, consumidores, empresas, institutos de investigación, etc.).

Se redactan en:

organismos de normalización nacionales (IRAM, BS, VDE, UNE, etc.) o internacionales (IEC, ISO) que reúnen a las partes, coordinan los esfuerzos/voluntades y las generan/publican.

Definen:

términos: los que se utilizan en las mismas normas

límites: a los que se deben ajustar los parámetros definidos

procedimientos para verificar todo lo anterior

Leyes, decretos resoluciones o disposiciones pueden hacer **OBLIGATORIOS** los acuerdos voluntarios alcanzados en las normas

Normativa en Incertidumbre

- ▶ Ante la necesidad de **uniformar criterios** en la evaluación de la incertidumbre el BIPM aprobó en 1981 una recomendación del grupo de trabajo de 1980.
- ▶ En 1993 diferentes organismos internacionales (BIPM, ISO, IEC, OIML, etc.) generaron conjuntamente la "Guía para la expresión de la incertidumbre en las Mediciones" (GUM: Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of measurements)
- ▶ En nuestro país la norma **ISO 9500** (Procedimientos para la evaluación de la incertidumbre de la medición) sigue exactamente esa guía.